

Slide Titre

- Bonjour à tous ; je suis Juste Raimbault, doctorant à Géographie-cités et au LVMT. Je remercie le jury pour l'honneur qu'il me fait d'évaluer ce travail de thèse, et le public pour sa présence.
- Je remercie les rapporteurs pour le travail fourni. J'ai pris bonne note des pistes d'amélioration et des corrections suggérées - la version courante en incluant une grande partie, l'ensemble sera pris en compte dans la version finale avec les suggestions formulées lors de la soutenance.

Parcours

- Il n'est pas inintéressant, en introduction, d'explicitier mon parcours personnel, ce qui permettra de mieux appréhender les positionnements et les choix que nous développerons.
- Partant d'une formation d'ingénieur généraliste, mon intérêt pour l'urbain m'a poussé vers la découverte du monde de l'architecture et de l'urbanisme, puis une formation à l'Ecole des Ponts et Chaussées en parallèle de la formation interdisciplinaire du Master Systèmes Complexes, dont le choix m'a été par la rencontre déterminante de Paul Bourguin et Kashayar Pakdaman, que je remercie aujourd'hui.
- Finalement, une orientation progressive vers les sciences humaines et sociales, et le choix de la géographie a justement permis d'articuler ces deux aspects théorique et thématique dont je positionne l'intégration comme une composante cruciale de mon identité scientifique.
- Les illustrations à droite montrent cette évolution progressive dans les modèles développés à différentes périodes : jeu de la vie, morphogenèse hybride, réseau biologique auto-organisé, analyse des dynamiques territoriales en Ile-de-France.

Exemple introductif

- Je propose pour introduire le sujet de présenter un exemple concret.
- Le développement récent du réseau à grande vitesse Chinois permet d'observer des interactions effectives entre réseaux et territoires, dans le cas particulier des réseaux de transport et du développement urbain ici. Nous relatons ici le cas du Delta de la Rivière des Perles, et plus particulièrement le quartier de Tangjia sur la commune de Zhuhai.
- Par exemple à gauche, la photo de la gare montre une publicité pour la promotion de l'utilisation du train et de la proximité à la gare, à droite on peut voir des quartiers entièrement nouveaux en construction autour des gares.
- L'accessibilité a subi des transformations considérables pour cet exemple de Tangjia, qui représentait une centralité locale au moins depuis le 17^e siècle jusqu'à très récemment, avant de se retrouver noyé dans la méga-région urbaine née de la conjonction d'une conjoncture historique, politique, économique, notamment à l'époque de la Doctrine de la Porte Ouverte de Deng Xiaoping.
- Ce cas particulier n'illustre que le haut de l'iceberg de dynamiques complexes d'interactions, que nous prendrons le parti d'étudier selon un point de vue particulier que nous allons détailler par la suite.

Problématique

- Nous pouvons à présent préciser la problématique générale de la thèse et la stratégie adoptée pour y répondre.
- Un certain nombre d'approches, comme celle de la théorie évolutive des villes élaborée par Denise Pumain, et en particulier les travaux d'Anne Bretagnolle dans le cas des réseaux de transport et des villes, postulent des dynamiques fortement couplées entre ces deux objets, comprises comme co-évolutive, au sens d'interdépendances réciproques fortes entre les différentes composantes du système.
- Notre premier axe de recherche est ainsi de tester la pertinence de ce positionnement, en cherchant à construire une définition précise ainsi qu'une méthode de caractérisation empirique de ces dynamiques co-évolutives

- Pour de nombreuses raisons que nous ne pourrions détailler intégralement ici, mais qui incluent la pauvreté des données disponibles, les spécificités de chaque cas d'étude considéré, des dynamiques s'opérant sur le temps long, des couplages forts entre composantes rendant leur compréhension couplée plus difficile, la connaissance est rapidement limitée. Nous considérons alors la modélisation comme un instrument de connaissance, permettant de tirer des conclusions indirectes sur les processus, de considérer des systèmes génériques, de tester des hypothèses dans des laboratoires virtuels, à différentes échelles et selon différents aspects.
- Notre deuxième axe s'articule ainsi autour de la construction de modèles de co-évolution, incluant la détermination d'échelles et ontologies pertinentes pour cette modélisation. La modélisation est donc un sujet d'étude à part entière, confirmant la dualité de notre travail affirmée précédemment.

Cartographie des disciplines

- Afin de comprendre le positionnement et l'enjeu posé par notre problématique, nous proposons une synthèse de l'état de l'art des approches pouvant être reliées à la modélisation des interactions entre réseaux et territoires, qui est le cadre plus global dans lequel s'insère la co-évolution.
- Nous avons mené un travail d'épistémologie quantitative, c'est à dire de cartographie des connaissances (ce qui est plus général qu'un exercice de bibliométrie), autour des modèles s'intéressant aux relations entre réseaux et territoires.
- Sans rentrer dans le détail de la méthode qui se base sur un couplage d'analyse de réseaux de citations et de réseaux sémantiques, nous présentons ici une carte issue de la spatialisation d'un réseau de citations. Nous observons le positionnement relatif des disciplines, de la géographie critique et sciences politiques ainsi que géographie théorique et quantitative à gauche, et la physique à l'opposée, le pont étant fait par l'économie urbaine, la planification, les études d'accessibilité et le transport. Notre positionnement est donc forcément à cheval sur l'ensemble de ces disciplines : nos modèles de systèmes de villes emprunteront à la géographie, ceux de morphogenèse à la physique et à l'économie, tandis que les études d'accessibilité jouent un rôle crucial dans les études empiriques que nous menons.
- De plus, un très faible nombre d'approches se positionne explicitement comme modélisant une co-évolution, et celles-ci sont dispersées dans différents domaines.

Positionnement théorique

- Nous commençons ainsi par détailler nos fondations théoriques, qui conditionnent les objets et processus étudiés, permettent de préciser la définition de la co-évolution, et de suggérer des entrées thématiques pertinentes.
- Concernant la construction des objets géographiques étudiés, notre entrée sur les villes et les territoires suit celle de la Théorie évolutive, considérant les villes comme systèmes dans des systèmes de villes, et les territoires comme constructions associées. Au sein de ceux-ci émergent des réseaux par l'intermédiaire de la réalisation de projets transactionnels au sens de la théorie territoriale des réseaux de Gabriel Dupuy. Reformulé sous cet angle, l'existence et la nature des processus de co-évolution revient à comprendre les processus précis par lesquels cette matérialisation peut s'opérer, et réciproquement dans quelle mesure celle-ci peut influencer les dynamiques territoriales.
- Nous proposons alors une définition de la co-évolution, basée sur une perspective multi-disciplinaire, proposant 3 niveaux possibles auxquels des processus de co-évolution peuvent opérer : celui des individus, lorsque les caractéristiques de différents éléments s'influencent réciproquement ; celui des populations - qui correspondra au sens statistique et celui originel introduit par la biologie, supposant l'existence de niches au sein desquelles les caractéristiques de deux populations sont mutuellement liées ; un niveau systémique correspondant à des interdépendances généralisées entre agents.
- Deux entrées pour répondre à notre problématique sont alors proposées : une entrée par la morphogenèse, que l'on peut comprendre comme l'émergence de la forme et de la fonction d'un système, et qui est suggérée par la notion de niche territoriale au sein de laquelle une coévolution statistique s'opère ; une entrée par la théorie évolutive permettant d'appréhender les systèmes au niveau macroscopique.

Méthode de caractérisation

- Elaborant sur ces bases théoriques, celles-ci demandent une vérification empirique, qui demande un travail méthodologique de construction d'une méthode de caractérisation, puisque la littérature n'en propose pas dans le cas des systèmes territoriaux, et qui serait associées à une définition précise.
- Le schéma ici décrit le principe de l'application d'une méthode de corrélations spatio-temporelles retardées à des variables caractéristiques des éléments étudiés. Plus précisément, supposons la donnée de variables de mesure pour les dynamiques des territoires et pour celles des réseaux, qui seront par exemple la croissance de la population et celle de l'accessibilité. La corrélation entre les séries temporelles correspondantes, au sein de niches spatiales et sur une fenêtre temporelle, étant donné un retard entre les deux séries, permet de caractériser une causalité faible entre les deux variables.
- Par exemple, la première ligne montre une corrélation toujours nulle en fonction du retard, et pas de relation entre les variables. La deuxième et la troisième un maximum pour un retard positif ou négatif, et donc un sens de causalité. La dernière nous intéresse particulièrement, puisque une causalité réciproque s'observe, ce qui correspondra à une co-évolution au sens statistique que nous avons défini.
- La dernière colonne donne l'interprétation de ces relations sous forme d'un graphe causal.

Observations empiriques

slide a

- L'application de cette méthode à différents cas d'étude, à différentes échelles temporelles et spatiales, donne des résultats contrastés.
- Le premier exemple présenté ici, réalisé en collaboration avec Solène Baffi, montre les graphes de corrélations retardées pour les croissances de l'accessibilité et de la population sur le temps long (1930-2000) en Afrique du Sud. Nous retons que le graphe se lit de la façon suivante : l'existence d'une corrélation non-nulle, qui prend en compte les barres d'erreur, pour un retard positif ou négatif, implique une relation de causalité faible entre les variables correspondantes. Un effet statistiquement significatif montre une inversion du sens de la causalité au cours du temps, suggérant un impact des politiques de ségrégations non seulement sur les dynamiques territoriales, mais aussi sur leur relations avec celles des réseaux, en quelque sorte un effet au second ordre.

slide b

- Un second exemple montre ici le cas métropolitain des quartiers de gare du Grand Paris express, pour lequel nous avons recherché des effets d'anticipation par l'annonce du tracé de cette nouvelle infrastructure dont la construction a récemment débuté. Les variables étudiées sont ici des caractéristiques socio-économiques ainsi que les dynamiques des prix immobiliers. Il est plus difficile de voir des effets significatifs, mais nous observons par exemple une bulle des prix immobiliers autour des gares.
- Dans le cas de la France sur le temps long que nous ne montrons pas ici, aucune relation n'est quantifiable. Ainsi, on observe empiriquement une diversité de situations, diversité que les modèles devront chercher à reproduire.

Modélisation macro

slide a

- Les modèles macroscopiques que nous avons introduit se basent sur les paradigmes de modèles d'interaction au sein des systèmes de villes, dans la lignée des modèles Favaro-Pumain ainsi que Marius développé par Clémentine Cottineau. A l'intermédiaire entre un modèle agent et un modèle discret de système dynamique, ils permettent de capturer la complexité via la non-linéarité, en moyennant les effets stochastiques.
- Nous considérons les villes et leur populations, et le réseau de transport entre celles-ci, dans lequel circulent des flux. On a pour l'évolution des populations un terme de croissance endogène correspondant au modèle de Gibrat, un terme de croissance due aux interactions directes, et un terme de rétroactions des flux. Le réseau peut quant à lui croître par effets de seuil en fonction des flux, selon différentes spécifications.

- Une première application est faite dans le cas d'un réseau statique, c'est à dire sans co-évolution à proprement parler mais avec des effets de réseau via l'effet des flux sur la croissance des villes. Nous obtenons une amélioration du pouvoir explicatif du modèle pour les données de population françaises (1830-1999), après avoir contrôlé le surapprentissage par l'application d'une méthode développée spécifiquement pour les modèles de simulation.

slide b

- L'application d'une version co-evolutive du modèle à des systèmes de villes synthétiques révèle de nombreuses configurations en termes d'interactions entre variables de territoires et variables de réseau, au sens de la caractérisation empirique par corrélations retardées, et notamment des régimes aux causalités circulaires correspondant à une co-evolution. En comparaison, l'application au modèle simpopnet révèle un nombre significativement plus faible de régimes atteints.
- Enfin, la calibration sur données de population et ferroviaires pour le système de villes français montre que la prise en compte de la co-évolution améliore l'ajustement sur certaines périodes, et permet l'inférence de paramètres liés à des processus comme l'effet tunnel, pour lequel on retrouve typiquement le rôle du TGV dans le survol des territoires.

Modélisation meso

slide a

- A l'échelle mesoscopique, notre paradigme principal de modélisation est la morphogenèse, que nous interprétons comme l'existence d'une architecture émergente correspondant à un couplage fort entre forme et fonction. Le réseau permet justement d'intégrer des propriétés fonctionnelles de l'espace urbain dans les variables locales.
- Un premier modèle de co-évolution de base sur les processus de réaction-diffusion, qui traduisent abstraitement les effets d'agglomération et de congestion au sein des systèmes urbains. Ceux-ci sont régis par un potentiel local qui dépend à la fois des variables morphologique et des variables fonctionnelles, incluses dans notre cas par les différentes centralités dans le réseau. Le couplage fort est bouclé par une croissance du réseau s'adaptant à l'évolution de la population, suivant une multi-modélisation de sa croissance par heuristiques complémentaires (incluant ruptures de potentiel déterministe et aléatoire, coût-bénéfices, croissance de réseau biologique). Ces différentes heuristiques s'avèrent complémentaires pour produire l'espace topologique faisable en termes de configurations de réseau produites. Par ailleurs, le calcul des indicateurs morphologique, de réseau et leur corrélations sur données réelles pour l'ensemble de l'Europe sur fenêtres spatiales de taille comparable, permet de calibrer le modèle. Un compromis entre premier ordre (valeur des indicateurs) et second ordre (distance des matrices de corrélation) est obtenu, montrant que le modèle est capable dans une certaine mesure de capturer simultanément des formes et leur interactions.

slide b

- Un dernier modèle, le modèle Lutecia, a été introduit afin d'explorer le rôle des processus de gouvernance dans la croissance du réseau de transport. A une échelle métropolitaine, un modèle Luti stylisé (extension du modèle de Lowry) est couplé à un réseau d'infrastructure dont la croissance est gérée par des acteurs politiques cherchant à maximiser l'accessibilité des zones dont ils ont le contrôle. L'utilisation de théorie des jeux permet de déterminer des probabilités de collaboration entre acteurs pour la construction de nouvelles infrastructures. Nous obtenons par exemple différentes structures de réseau émergentes correspondant à différents niveaux de collaboration.
- Ainsi, nous avons modélisé différents aspects de la co-évolution des réseaux de transport et des territoires, à différentes échelles.

Lecture par les domaines de connaissance

slide a-b

- Nous proposons finalement de détailler une grille de lecture originale des résultats que nous venons de présenter.

- L'articulation selon différentes dimensions de la connaissance peut en fait se généraliser, et une lecture de la thèse au prisme des *Domaines de connaissance*, initialement introduits par Livet, Sanders et Muller pour la construction de modèles de simulation en sciences sociales, permet de mieux positionner notre contribution ainsi que de prendre du recul sur l'organisation des connaissances produites.
- Nous voyons ici les trois domaines initiaux, théorique (constructions conceptuelles), empirique (connaissances concrètes) et de la modélisation, tous en interaction forte, illustrés par des éléments de différentes parties de la thèse. Tout au long de notre travail, cette interdépendance est inévitable et même prise comme un atout pour la construction d'une connaissance voulue complexe au sens de Morin.
- *slide 4b* Un approfondissement de la lecture par domaines conduit vite à intégrer trois domaines supplémentaires, ceux des méthodes, outils et données, dans lesquels nous avons également été amenés à contribuer. Nous postulons qu'une connaissance complexe nécessite un couplage fort des différents domaines. La suite de la présentation suivra ce prisme de lecture.

slide c

- Pour donner un aperçu d'une mise en perspective plus fine de l'ensemble des contributions principales de la thèse, ce schéma situe les différentes sections à la fois par rapport aux domaines et aux axes de la problématique.

Mise en perspective

- Avant de conclure sur les perspectives ouvertes, je souhaiterais remettre en contexte le cœur de la thèse au regard de son cadre plus global, contenu notamment dans les annexes, qui permettent une articulation plus générale.
- Le travail de définition de la co-évolution, qui a requis la mise en place d'un certain niveau de réflexivité, d'approches interdisciplinaires, et de méthodes et d'outils d'analyse d'épistémologie quantitative, s'inscrit au sein de deux axes de travail en épistémologie et épistémologie quantitative.
- La caractérisation peut être associée à des travaux thématiques plus larges, qui permettent d'appréhender indirectement d'autres aspects des relations entre territoires et réseaux.
- Enfin, la modélisation s'inscrit au sein de l'élaboration de cadres systémiques, à différents niveaux d'abstraction, incluant le cadre de connaissance qui a guidé notre lecture ici.

Ouvertures

- Les perspectives de recherche ouvertes par notre travail sont considérables, à la fois en ce qui concerne les modèles introduits en eux-mêmes et la modélisation de la co-évolution, mais aussi des perspectives plus larges.
- Des développements sont déjà en cours et méritent d'être mentionnés pour illustration.
- Dans le cadre de développement de méthodes génériques d'exploration de modèles spatiaux, ici à l'ISC avec l'équipe d'OpenMole que je remercie d'ailleurs de m'avoir accueilli, la partie Luti du modèle Lutecia est utilisée comme modèle jouet de test. Ceci nécessite un redeveloppement de netlogo vers scala, repllant les problématiques de passage à l'échelle pour l'utilisation de calcul intensif : nous rappelons que malgré les environ 200 ans de calcul utilisés pour la thèse, nos explorations sont restées modestes et simples concernant les méthodes appliquées. Maintenant de l'autre côté, ce modèle est une excellente opportunité, autant un moyen qu'une fin pour poursuivre la recherche dans ce domaine.
- Une comparaison systématique des modèles de croissance urbaines, incluant notre modèle de coévolution, mais aussi le modèle Favaro-Pumain et le Marius, sur les multiples systèmes de villes dans le monde pour lesquels les données standardisées sont issues de l'erc geodiversity, est un développement important pour la compréhension des processus de croissance urbaine.
- Des perspectives plus générales, qui peuvent être formulées sous la forme de projets, s'ouvrent également :

- Le premier projet, celui de mon postdoc en cours, s'attelle au développement de nouvelles méthodes d'exploration des modèles de simulation spatiaux. Trois axes complémentaires concernent la sensibilité aux meta-parametres spatiaux obtenue par l'intermédiaire de la generation de données synthétiques spatiales, la robustesse des methodes d'exploration et de calibration par algorithmes genetiques, notamment à la stochasticité, et la multi-modelisation.
- Un second projet s'oriente vers la construction de théories intégratives pour les systèmes territoriaux, au sens de la feuille de route c'est à dire à la fois horizontalement (répondant à des questions transversales) et verticalement (multi-échelle). Le couplage de la theorie evolutive à celle du scaling, par l'intermediaire du couplage des modeles developpes ici, permet l'intégration verticale. Une reflexion sur le role de l'intelligence artificielle au sein des systemes territoriaux suggere une intergation horizontale, tandis qu'une integration supplementaire, celle des domaines de connaissance, serait permise par le reflexivite qui découle des travaux en épistémologie quantitative.

Pour conclure simplement, modestement, et de la même manière que le mémoire, nous pouvons ainsi dire que *la route est longue mais la voie est libre*.